

報告

潜熱蓄熱材を利用する壁体の伝熱解析に関する基礎的検討

Heat Transfer Analysis of Wall Component using Phase Change Materials

本間義規<sup>\*1</sup>

Yoshinori HONMA

**Keywords:** Phase Change Materials, Enthalpy Method, Numerical Simulation

潜熱蓄熱材, エンタルピー法, 数値解析

1.はじめに

潜熱蓄熱材 (Phase Change Materials, 以下、PCM と記す) は固相・液相間の相変化現象を利用する材料である。一般に、hoogeneous な材料の基本的な熱物性は容積比熱と密度、熱伝導率で表されるが、相変化する材料は、融解・凝固点を挟んだ温度変化を生ずる際、当該物質が有する比熱以上の熱容量を利用できるため、系への熱の出入りを許容しながら一定温度を維持したい状況等で利用されている。例えば、一番身近な PCM として水 (氷・水間の相変化) がある。相変化熱が 335 J/g と大きく、深夜電力を利用した氷蓄熱空調システムなどに利用されているが、室内環境のような常温域では潜熱蓄熱材として利用できない。そのため、建築空間への応用を企図する場合、一般には相変化温度の高いパラフィン系や無機塩系の PCM が利用されることになる。しかし、需要が多くないためコスト高であるのがネックであるのと同時に、そもそもどのような PCM を選定すればその性能を最大限活用できるのか、を把握することが必要となる。

PCM 選定の際の必須項目は、相変化温度をどのように設定するか、また、蓄放熱量のコントロールをどのようにするかにある。本報では、特に建築空間での PCM の利用を念頭においた熱性能予測のためのシミュレーションツールを作成したので、その内容について報告する。

2. 融解・凝固問題の数値解法

2.1 移動境界伝熱

一般に、融解・凝固は移動境界伝熱問題として扱われるが、その代表例は前述した水の凍結問題である。熱的な利用という側面のほか、配管凍結やロードヒーティング、食物の冷凍保存など、身近な生活環境でも重要な物理現象であり、古くから熱力学的な検討が行われてきた。水の凍結問題を最初に理論的に扱ったのは 1860 年頃、Neumann によってであると言われており<sup>1)</sup>、厳密解として Neumann 解と Stefan 解が既に知られている。また、準定常近似解法や摂動法などの近似解法も 19 世紀、20 世紀

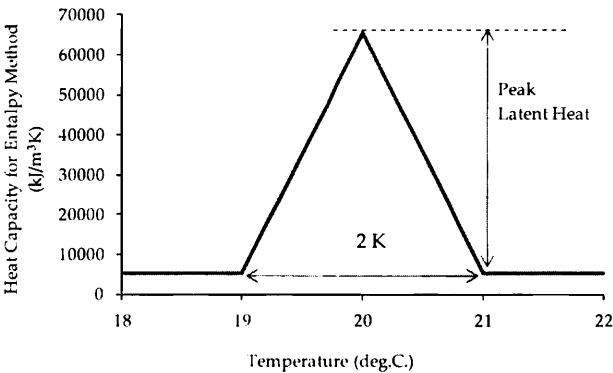
の間に多数研究されている。

現在、移動境界問題、特に融解・凝固問題で利用されることの多い数値解法は、Murray-Landis 法やエンタルピー法、境界固定法などであるが、本研究では、これらの中でも通常の伝熱問題と同等に扱える最も簡便な解法であるエンタルピー法について検討した。

2.2 エンタルピー法

エンタルピー法は、潜熱を通常の熱容量項に含めてみかけの熱容量として伝熱拡散方程式を解く方法である。そのため、基礎式の形は(1)式に示すように通常の熱伝導方程式と殆ど変らない。ただし、比熱項が潜熱によって変化することから、そのモデル化が必要となる。

図 1 がその概念を示すモデルである。PCM の DSC 曲線が得られているなら、それをもとに関数近似すればよい。しかし、融解温度だけ与えられて、プロファイルが不明の場合、2K の温度変化幅で、潜熱蓄熱量の値とピーク潜熱の値が頂点となるようなモデル化を行えば、三角形の面積が潜熱蓄熱量に一致するので、非常に簡単なモデル化ができる (2~5 式)。



上記の例は、密度 855kg/m<sup>3</sup>、相変化熱 70J/g の材料が 2K の温度幅に三角形に分布するというモデル化である。三角形部分の面積 (積分値) が相変化熱となる。

図 1 エンタルピー法における相変化熱のモデル化

<sup>\*1</sup> 生活科学科生活科学専攻, 教授

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{c^* \rho} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad \dots (1)$$

$$T < T_o - 1 \text{ のとき } c^* = c \quad \dots (2)$$

$$T_o - 1 < T < T_o \text{ のとき } c^* = c + R \{ T - (T_o - 1) \} \quad \dots (3)$$

$$T = T_o \text{ のとき } c^* = c + R \quad \dots (4)$$

$$T_o \leq T \leq T_o + 1 \text{ のとき } c^* = c + R - R \{ (T_o + 1) - T \} \quad \dots (5)$$

ただし、T:温度 (°C) ,t:時間 (s) ,λ:熱伝導率 (W/mK) 、  
c:比熱 (J/kgK) ,c\*:相変化を考慮したみかけの比熱(J/kgK)、  
ρ:密度 (kg/m³) ,x:長さ (m) ,To:相変化時ピーク温度 (°C)

一般に、PCM は融解時と凝固時とは異なるプロファイルとなることや、水・氷のような潜熱集中型の PCM の場合は数値解析上の問題が生じることがあるが、潜熱分散型の PCM の場合、その熱的な性状や期間熱負荷等の基礎的な検討には、図 1 のような近似でも十分必要な情報を与えてくれるものとなる。

2.3 エンタルピー法に基づく簡易解析例

潜熱考慮の有無の影響をみるため、簡易な境界条件 (余弦波室温変動と余弦波日射量変動) を与えた簡易伝熱シミュレーションを実施した。具体的には、(6)式に示すような室内側空気温度 (平均 20°C、振幅 5°Cの余弦変化) を与え、外気温度は 10°C固定、日射については正午に最大値 600W/m² となるような余弦波日射量を与えてシミュレーションした。対象は、PCM を構造用合板でサンドイッチした壁体 (構造用合板 12mm+PCM\_5.26mm+構造用合板 12mm) である。なお、材料仕様は表 1 に示す通りである。計算結果を図 2、図 3 に示す。図 2 が潜熱を無視した場合の温度変化、図 3 が潜熱を考慮した場合 (エンタルピー法) の温度変化である。図 2 をみると、材料の熱容量効果によって 1 時間程度応答遅れが生じているが、なだらかな変動である。図 3 は通常の応答遅れだけではなく、PCM 内とその両境界の温度変動が 21.8°C 近辺でなだらかになっていることがわかる。

$$T_{in} = 20 + 5 \cdot \cos \frac{2\pi (Time - 14)}{24} (°C) \quad \dots (6)$$

表 1 材料物性値

	材料名	λ (W/mK)	容積比熱 (kJ/m³K)	潜熱 (J/g)	厚 (mm)
1	構造用合板	0.113	940	0	12
2	PCM	0.16	5347	21.8°C 70J/g	5.26
3	構造用合板	0.113	940	0	12

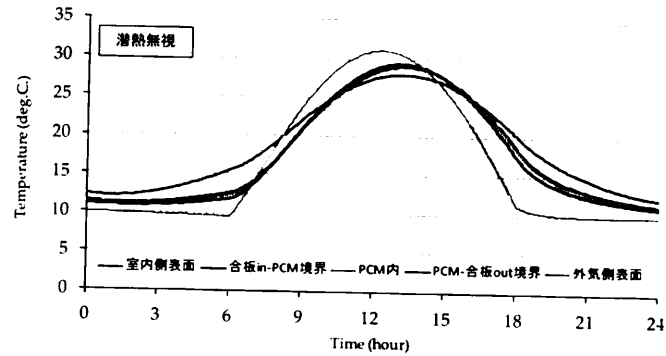


図 2 部材各部温度変動(潜熱無視の場合)

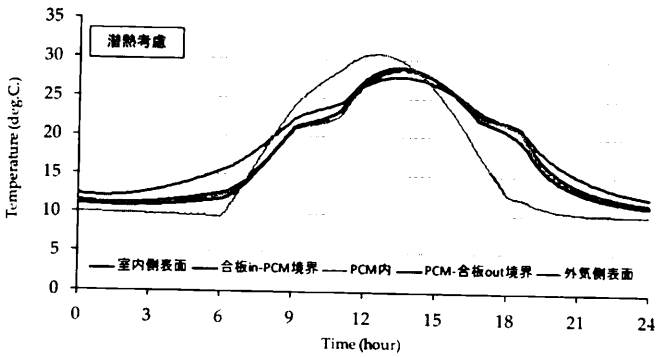


図 3 部材各部温度変動(潜熱を考慮した場合)

3.通気層なし PCM 断熱壁体を対象とした解析

3.1 シミュレーション条件

外気境界条件として拡張アメダス気象データ (盛岡標準年) を用いた通年に渡る通気層なし断熱壁体の温度変動について検討を行う。本研究では、図 4 に示すような通気層なしの断熱壁体を対象とする。一般に、壁層部分に PCM の融解・凝固温度をクロスするような比較的大きな温度変化を導入するためには、むしろ通気層を利用しないほうが都合が良いからである。PCM の設置位置は壁層内の温度プロファイルに影響を受けるが、季節条件や特に日射受熱量によって熱流の向きが逆転することなどから、断熱材の内側に設置するケースと外側に設置するケースの 2 パターンを対象とした。なお、今回は、計算を簡略化するため外装材を無視している。

今回検討する壁層構成材料は内装材として石膏ボードを、外装材として構造用合板を用いる。断熱材は平成 11 年省エネルギー基準 3) の II 地域仕様をクリアする高性能グラスウール 16k 100mm とした。また、PCM は融解・凝固温度 4 水準 (15、19、23、27°C) を設定し、また厚みを 2 水準 (10 mm、15 mm) 設定する (表 2)。これらの材料物性を表 3 に示す。

また、境界条件として、室内側は年平均温度 21°C、年振幅 4°C、日振幅 3°Cの余弦室温変動を与え、6~22 時に 20°C 以下の場合には 20°C になるような設定とする。総合熱伝達率を与える第 3 種境界条件とする (7 式)。外気側は放射と対流を分離して第 3 種境界条件として与える (8 式)。計算は空間に関して 1 次元コントロール・ボリューム法を適用した非等分分割とし、時間に関しては後退差分とした。計算時間間隔は 0.1h である。

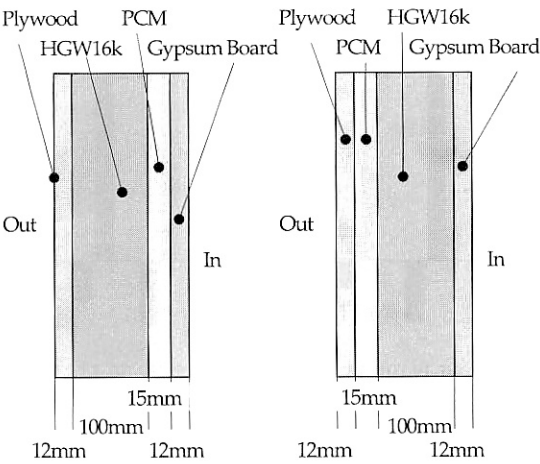


図 4 計算モデル  
(PCM15mm の場合、左：内側設置、右：外側設置)

表 2 検討パラメータ

設置位置 (2 水準)	内側、外側
相変化温度 (4 水準)	15℃、19℃、23℃、27℃ (4℃刻み)
材料厚み (2 水準)	10mm、15mm

室内側境界条件

$$\left. \begin{aligned} T_{in} &= 22.5 + 4.5 \cdot \cos \frac{2\pi(\text{Day} - 212)}{365} \\ &\quad + 3 \cdot \cos \frac{2\pi(\text{Time} - 14)}{24} (\text{℃}) \\ J_{in} &= \alpha_{in} (T_{surf,i} - T_{in}) \\ \text{if } T_{in} &< 20 \text{ deg.C. at } 6\text{to}22, \\ \text{Then } T_{in} &= 20 \text{ deg.C.} \end{aligned} \right\} \dots (7)$$

外気側境界条件

$$\left. \begin{aligned} J_{out} &= \alpha_{c,out} (T_{out} - T_{surf,out}) + \alpha_{r,out} (T_r - T_{surf,out}) \\ &\quad + (1 - r) \cdot J_o - \varepsilon \sigma (T_{surf,out}^4 - T_r^4) \end{aligned} \right\} \dots (8)$$

ただし、 $T_{in}$ :室内環境温度 (℃)、 $T_{out}$ :外気空気温度 (℃)、 $T_{surf,i}$ :室内側表面温度 (℃)、 $T_{surf,out}$ :外気側表面温度 (℃)、 $\text{Day}$ :1月1日を起点とする経過日数、 $\alpha_{in}$ :室内側総合熱伝達率 (9.0 W/m<sup>2</sup>K)、 $\alpha_{c,out}$ :外気側対流熱伝達率 (18.0 W/m<sup>2</sup>K)、 $\alpha_{r,out}$ :外気側放射熱伝達率 (4.0 W/m<sup>2</sup>K)、 $r$ :構造用合板表面反射率 (0.5)、 $\varepsilon$ :構造用合板表面長波長放射率 (0.9)、 $\sigma$ :シュテファン・ボルツマン定数 (5.67×10<sup>-8</sup> W/(m<sup>2</sup>・K<sup>4</sup>))

表 3 材料物性値

材料名	$\lambda$ (W/mK)	容積比熱(kJ/m <sup>3</sup> K)	潜熱(J/g)
構造用合板	0.113	940	0
PCM	0.16	5347	70
HGW16k	0.038	13.4	0
石膏ボード	0.24	609	0

3.2 冬期(02/01)の両側表面温度変動

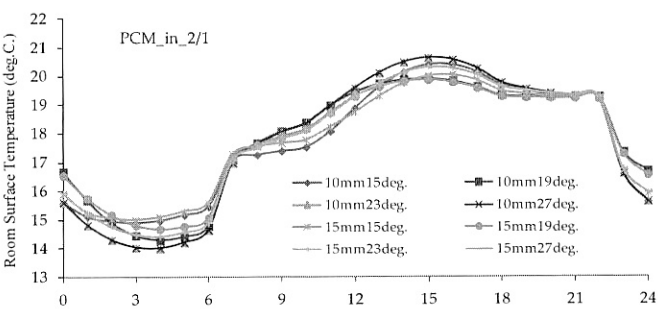


図 5 内側設置の場合の室内側表面温度変動(02/01)

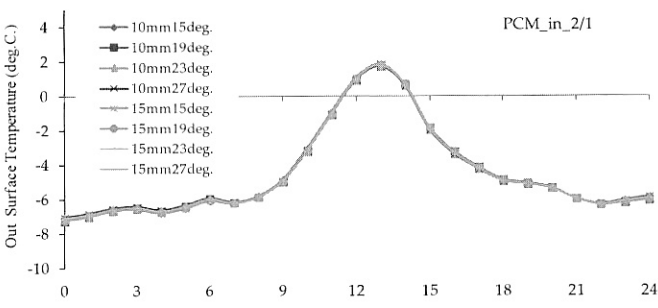


図 6 内側設置の場合の外気側表面温度変動(02/01)

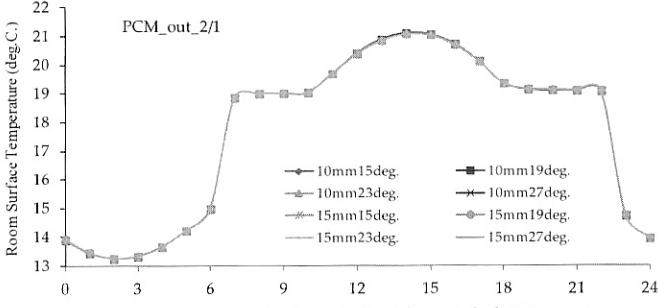


図 7 外側設置の場合の室内側表面温度変動(02/01)

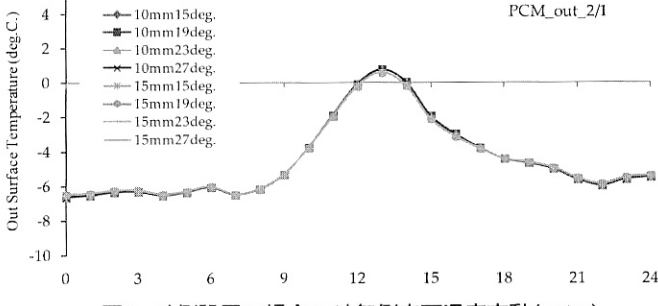


図 8 外側設置の場合の外気側表面温度変動(02/01)

冬期 (02/01) における壁体両表面の温度変動を図 5～8 に示す。図 5 は PCM を内側に設置した場合の室内表面温度変動である。仕様によって温度変化に大きな違いがあることがわかる。夜間は、相変化温度 15℃の PCM 仕様で最も高い温度を保っており、日中は相変化温度 19℃が最も低くなっている。これはちょうど温度変化が相変化温度をクロスする温度帯であることによる。図 6 は PCM 内側設置時の外気側表面温度変動である。PCM の仕様によって差が生じていない。図 7、図 8 は PCM を断熱材の外側に設置したときの壁体両表面温度変動である。PCM の仕様差はほとんどないことがわかる。これはいずれも温度変化帯が PCM の相変化温度帯とずれていることによる。

### 3.3 夏期(08/01)の両側表面温度変動

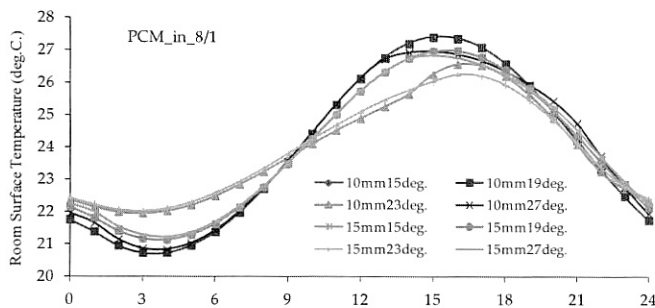


図9 内側設置の場合の室内側表面温度変動(08/01)

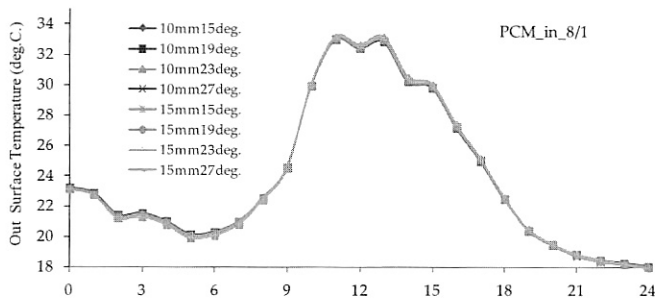


図10 内側設置の場合の外気側表面温度変動(08/01)

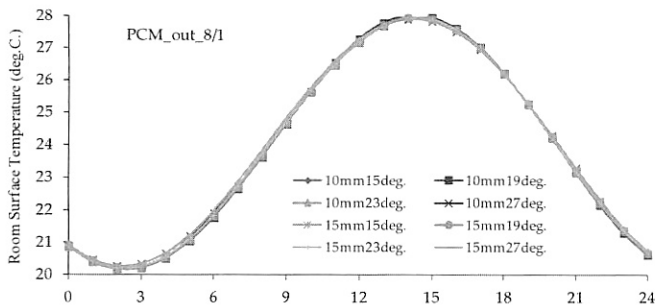


図11 外側設置の場合の室内側表面温度変動(08/01)

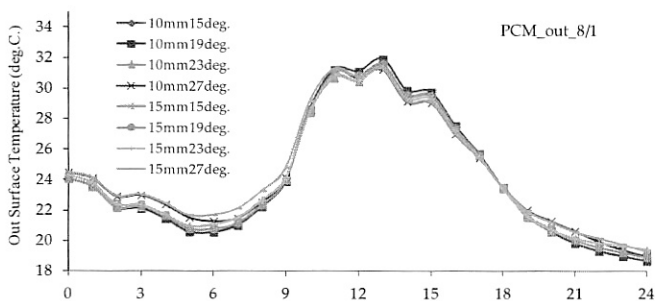


図12 外側設置の場合の外気側表面温度変動(08/01)

図9～12に夏期(08/01)の壁体両表面の温度変動を示す。断熱材の室内側にPCMを設置した仕様では、相変化温度23℃のものが日中の温度が上昇しにくく、10mmでは融解熱を消費しきって途中から温度上昇を始めるが、15mmではそのような変化が見られない。すなわち、15mmのPCMが、シミュレーションにおける条件下ではより効果的といえるが、ただ、その差は大きくない。図9は外気表面の温度変動であるが、断熱層の室内側に設置した場合では全く影響していない。それは断熱層の外側にPCMを設置した場合の室内表面温度でも同様である(図11)。断熱層外気側にPCMを設置したときの外気側表面

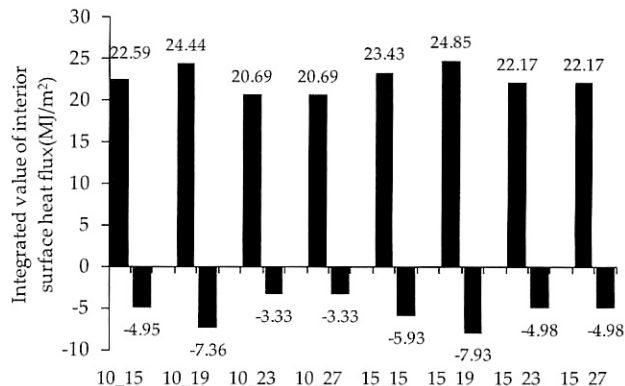


図13 内側設置の場合の室内側表面熱流積算値(2月)

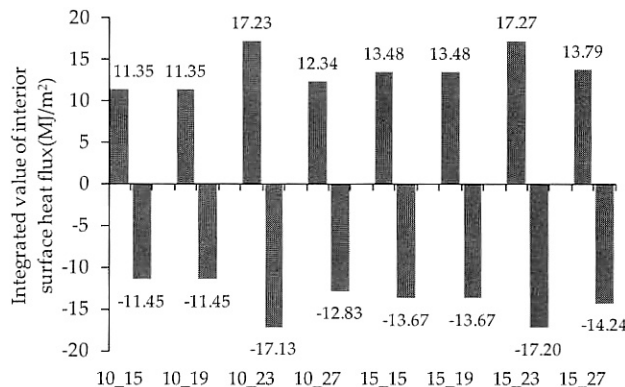


図14 内側設置の場合の室内側表面熱流積算値(8月)

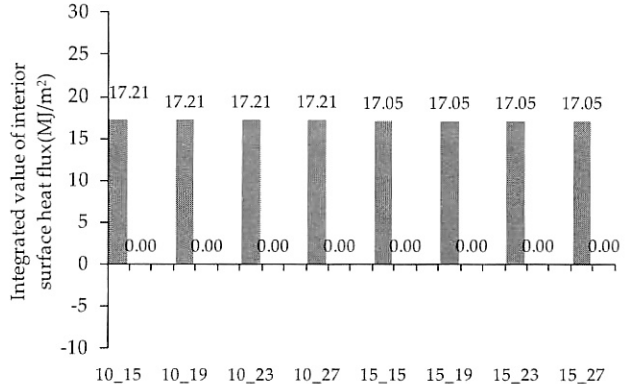


図15 外側設置の場合の室内側表面熱流積算値(2月)

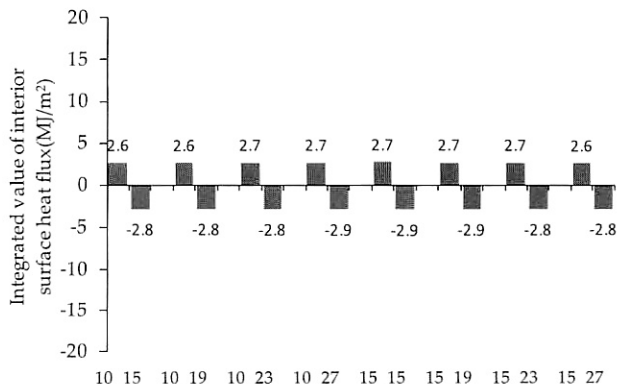


図16 外側設置の場合の室内側表面熱流積算値(8月)

温度はややPCMごとの差が生じている。相変化温度27℃の仕様で振幅が小さくなるが、その差は10%程度(10℃の振幅が9℃になる程度)である。

3.4 室内側表面熱流積算値の比較

図 13～16 に各仕様における室内側表面熱流の月積算値を示す。冬期は2月(672時間)を、夏期は8月(744時間)を検討対象とした。また、材料仕様を表す図中の表記は、PCM の厚さ(mm)と相変化温度(°C)の順に記載している。例えば「10\_15」は厚さ10mm、相変化温度15°CのPCMを表す。また、プラス側が室内側から外気側への流出を表し、マイナス側が外気側から室内側へ向かう熱流である。

図13は断熱材の室内側にPCMを設置した場合の2月における表面熱流積算値のグラフである。相変化温度15°Cおよび19°Cは、ちょうど室温変動域にあるため、熱流入量が大きくなっている。23°C、27°Cは厚み毎に同じ熱流変化をしている。つまり、相変化温度23°C、27°Cにおける10mmと15mmの差は、PCMの総熱容量(顕熱分の蓄熱量)の差によって生じている。

図15は、断熱層の外側にPCMを設置した場合の室内側表面熱流積算値である。厚み10mmと15mmとで0.16MJ/m<sup>2</sup>の差が生じているが、この差は熱容量の差であり、PCMの持つ相変化の効果はまったく活かされていない(相変化していれば、室内側へ流入する熱流が見られるが、それがゼロということは、常に外側への熱流出になっているということである)。

図13と図15は設置位置の違いによる熱損失の差異を示している。期間熱損失は流出および流入の積算値であるので、その値で比較してみると、断熱層の室内側にPCMを設置している仕様のほうが、外側に設置している仕様(つまり通常の仕様)よりも若干熱損失が増加する傾向にある(表4)。相変化温度19°Cの仕様のみが、室内側に設置することにより、約0.8%程度の熱損失抑制になっている。しかし、その差は小さく、省エネルギーという意味では、今回の壁体仕様では、ほとんど効果がないといえる。

図14はPCM内側設置の場合の8月の室内側表面熱流積算値(MJ/m<sup>2</sup>)を、図16は同じくPCM外側設置の8月の結果である。PCMを断熱層の内側に設置の場合(図14)、比較的大きな熱流入・熱流出を生じていることがわかり、夏期の内装表面温度の平準化に寄与していることが推定される。

図16は8月における外側設置の場合の室内側表面熱流積算値(MJ/m<sup>2</sup>)である。流出入熱量が小さく、仕様差がほとんどない。その性状は、図11の温度変動にも表れている。実質的な熱流積算値は、表5に示す通りPCMを内側に設置する場合も外側に設置する場合も大差ない。室内側設置で相変化温度23°Cの材料の場合、トータルでは熱損失となっているので、その意味(冷房負荷削減の意味)で効果があるといえるが、しかし、そもそも断熱材の熱抵抗により熱流入量自体が小さいため、大きな効果とは言い難い。

しかし、熱流出量が小さいということは、室温追随性が良いということでもあり、時変的な熱負荷を小さくできる、すなわち冷房機器の設備容量を小さくできる可能性があることを示唆している(今回のシミュレーションは境界条件として室温を与えているので、断定的にはいうことができない。詳細は室温を

表4 冬期(2月)におけるトータルの表面熱流積算値(MJ/m<sup>2</sup>)

		15°C	19°C	23°C	27°C
内側	10mm	17.64	17.07	17.36	17.36
	15mm	17.50	16.92	17.18	17.18
外側	10mm	17.21	17.21	17.21	17.21
	15mm	17.05	17.05	17.05	17.05

表5 夏期(8月)におけるトータルの表面熱流積算値(MJ/m<sup>2</sup>)

		15°C	19°C	23°C	27°C
内側	10mm	-0.10	-0.10	0.09	-0.49
	15mm	-0.19	-0.19	0.07	-0.46
外側	10mm	-0.19	-0.19	-0.18	-0.21
	15mm	-0.19	-0.18	-0.18	-0.21

未知とする多数室温変動シミュレーションに組み込んだ解析を行い、室温と壁体表面温度が相互に影響する状態での評価が必要となる)。

4.まとめ

PCMを壁体に適用するにあたり、相変化温度や厚みなどの設計目的のための利用、およびその効果を予測するため、エンタルピー法に基づく伝熱解析手法の開発に関して基礎的な検討を行い、PCMの相変化熱(潜熱)をモデル化して見かけの熱容量とすることにより、通常の伝熱解析として扱えることを示した。

そして、通気層なし壁体を対象とする簡易解析を行い、拡張アメダス気象データを外部境界条件に、余弦関数に基づく室温変動を室内側境界条件とする伝熱シミュレーションを行った。その結果、PCMの設置は断熱層の内側に置くこと、厚みの影響は、エネルギー収支としてはほとんど関係ないことを示した。

室内の放射環境改善という目的では、壁面温度をある温度範囲においては有効に機能することがわかった(今回のシミュレーションにおいて、相変化温度15°Cのケースが、冬期15°C以下に室温が低下する場合に表面温度抑制的に働いた状況や、夏期には相変化温度23°Cのケースが日中の最高温度抑制に効果があること)。

断熱層の室内側にPCMを設置する場合は、上記のような効果が見られたが、PCMを断熱層の外気側に設置するケースでは、内装表面温度の安定化効果はないことがわかった。しかし、夏期における壁体への熱流入状況を見ると、擬似的な断熱壁体、すなわち断熱性能の向上効果として機能しており、設備容量の低減に寄与する可能性が示された。

今回は通気層なしの壁体における基礎的な検討であったが、今後、通気層付き断熱壁体や光透過型のPCM壁体などを対象とした検討を行う予定である。

参考文献

1) 斎藤武雄：移動境界伝熱学、養賢堂、1994  
2) 本間義規：PCM建材を適用した断熱壁体の熱性状、岩手県立大学盛岡短期大学部研究論集第14号、41-44、2012.3

- 3) 住宅の省エネルギー基準の解説 3版8刷、財団法人 建築環境・省エネルギー機構、2011.11
- 4) DuPontTM EnergainR Data Sheet  
[http://energain.co.uk/Energain/en\\_GB/assets/downloads/documentation/download/energain\\_datasheet\\_EN.pdf](http://energain.co.uk/Energain/en_GB/assets/downloads/documentation/download/energain_datasheet_EN.pdf)
- 5) 社団法人化学工学会 蓄熱・増熱・熱輸送技術特別研究会、蓄熱技術－理論とその応用－第Ⅱ編－「潜熱蓄熱、化学蓄熱」、信山社サイテック、2001年
- 6) 近藤武士・射場本忠彦・坪田祐二・鎌田元康：潜熱蓄熱壁体による躯体蓄熱システムに関する研究、日本建築学会計画系論文集第540号、pp.23-29、2001年2月
- 7) 齊藤宏昭・土屋喬雄：木造住宅における潜熱蓄熱材の適応に関する研究 そのⅠ潜熱蓄熱材の数値解析と比較実験、日本建築学会大会学術講演梗概集(東海)、pp.669-670、1994.9
- 8) Belen Zalba et al.: Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications, Applied Thermal Engineering 23 pp.251-283, 2003
- 9) Amar M. Khudhair, Mohammed M. Farid, A review on energy conservation in building applications with thermal storage by latent heat using phase change materials, 263-275, Energy Conversion and Management 45, 2004

## 謝辞

本研究は、平成23年度生活科学専攻卒業生・小野寺礼華さんの卒業研究「相変化材料を用いた断熱壁体の伝熱性状解析」での検討をベースに、発展・拡張させたものである。また、本研究は、第20回(平成23年度)財団法人トステム建材産業振興財団(現：公益財団法人 LIXIL 住生活財団)助成「暖房ゼロエネルギー住宅に向けた顕熱・潜熱蓄熱型ダブルスキン構造に関する基礎的検討」の一部として実施した。記してここに謝意を表する。